第1章

メカトロ・システム機器の進化には分散処理が欠かせない

――ロボットに学ぶ分散処理の基本概念と課題

羅 志偉，平野慎也

メカトロニクス機器に分散処理を採用すると，可動部の各機能を階層構造でとらえることができ，性能の向上や機構の単純化を図れる．その一方で，開発環境などの整備の点には課題が残っている．ここではこうした分散処理の基本的な構成や利用のメリット，開発時の課題について，とくにロボットへの適用を意識しながら解説する．（編集部）

1．ロボットへの夢と現実

歩く，走る，飛ぶ，泳ぐ，物をつかむ，操る，たたく，投げる，さらにはピアノを弾く，テニスや野球，すもうなどのスポーツを行う．私たち人間や動物は，脳神経系における五感の分散処理と身体筋骨格系に対する分散制御で，実に柔軟で巧みな運動機能を実現しています（**図1**）．こうした身体運動を機械で人工的に実現しようという夢は，古くは紀元前までさかのぼることができます．そして，今日でも絶えず漫画やアニメなどに取りあげられ，私たちの童心を喚起しています．

工場などの生産現場で汎用機械として産業用ロボットが登場したのは1960年代のことでしたが，その後の技術革新によって，ロボットの高速化，高精度化は驚くほど高いレベルに達しました．また，ロボットの作業も簡単な部品の運搬から，溶接，塗装，組み立てなどに至るまで，多岐にわたって実現されるようになりました．日本は1980年をロボット元年と称し，そのころから産業用ロボットの生産および保有台数で世界一を誇ってきました．さらに近年では，

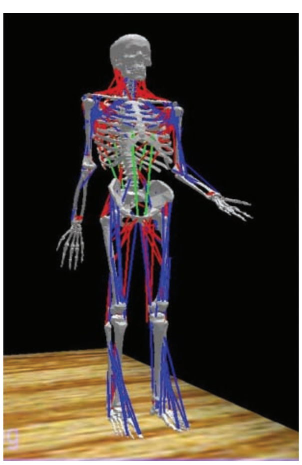


図1　人間の筋骨格系モデル
私たち人間は，脳神経系による分散階層制御により，120本以上の骨を300本以上の筋肉で駆動する．本モデルは，独立行政法人理化学研究所 バイオ・ミメティックコントロール研究センターが作成した．

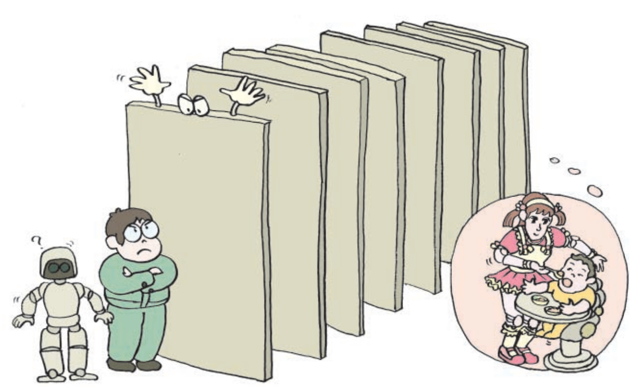


図2　ロボットの理想と現実
消費者が期待するロボットを作りだすために乗り越えなければならない壁は高く，何枚もある．

KeyWord　分散処理，分散制御，メカトロニクス，ロボティクス，多脚歩行ロボット，並列分散処理，人工知能，サブサンプション方式，双腕ロボット，タスク・スケジューリング

ヒューマノイドと呼ばれる人間型のロボットや，犬，蛇など，さまざまな形態を模倣した動物型ロボットが続々と発表されています．これによって，産業用にとどまらず，医療，福祉，介護，教育，娯楽，災害救助など，さまざまな分野においてロボットへの期待が広がっています(図2)．

昨今の新聞やテレビ，閉幕した愛知万博などを見ると，さまざまな最先端のロボットが開発されていることがわかります．歩くのはもちろんのこと，走ったり，倒れた状態から起き上がったり，また，人間と会話したり，握手したりと，部分的に見ればかなり高度なことがいとも簡単にできているようにみえます．費用さえ考えなければ，今すぐにでもわが家でロボットが活用できるのではないかと，錯覚しそうになります．

しかし，実際はどうでしょうか．それはまだ先のことではないかと思います．ロボット技術は，電気・電子技術，センサ・アクチュエータ技術，システム・制御技術，計算機・情報技術，機械・製造技術など，ハードウェアとソフトウェアの両面を集積して総合的に形成されるものです．その動作環境や作業内容の違いによって，技術的な難易度はかなり違ってきます．

具体的に，これまで工場で働いている産業用ロボットと，街や家庭などの生活環境または災害救助活動において想定されるロボットの間には以下の違いが挙げられます．

1）情報量の違い

工場は動作環境がよく整備されていますが，家庭などにおける生活環境はたいへん複雑で，かつ，時々刻々と変動しています．こうした環境変動を把握するために，ロボットは視覚，聴覚，触覚などの機能を備えて，環境に関する大量の情報を実時間で処理する必要があります．

2）自由度の違い

産業用ロボットは設計の段階で限られた作業しか前提としていません．つまり，最小限の運動自由度(関節)を装備するようにできています．家庭用や災害救助用のロボットは，環境の変動に対応できるように，また，多様な作業を実行できるように，より多くの運動自由度を備える必要があります．

3）知能の違い

産業用ロボットの動作は，基本的に現場の技術者が当日の作業内容に応じてティーチング・ボックスなどを使って一つ一つきめ細かく教示します．一般環境で活動するロボットは，人間による手軽な音声指令などで環境条件に応じて自律的に動作を決定しなければなりません．

4）安全性の違い

産業用ロボットは安全確保のため，人間から1m以上離れたところでしか作業することがないように厳しく規制されています．家庭用や災害救助用のロボットはむしろ，人間と綿密に接触しながら安全かつ柔軟に作業することが要求されています．

本稿は，こうしたロボットに対する要件を意識しながら，そのキー・テクノロジの一つである「分散処理」技術について概説します．また，現在の研究開発事例をいくつか紹介して，今後の課題について解説します．

2．メカトロニクスとロボティクスは何が違うのか

電子工学(electronics)と機械工学(mechanics)を結合し，機械を動かして制御する工学技術は，総称してメカトロニクス(mechatronics)と呼ばれています．これは機械システムにおけるエネルギー効率の改善や，機能の多様性・柔軟性の達成，さらにはマイクロコンピュータを取り入れることによって機械に知能を実現させることにつながることから，今日の飛行機，自動車，工作機械，ロボットなど，さまざまな機器に広く展開されるようになってきています．本誌でも2004年5月号で「『メカトロ機器開発』で身を立てる！」という特集でこのテーマが取りあげられました．

メカトロニクスの発展によって，今日ではすでに自動車とロボットの要素技術は区別できない状況になってきています．最近の高級車には，ECU(electronic control unit)といった電子制御ユニットが何十個も搭載されるようになりました．その分散処理技術に着目すれば，CAN(controller area network)やLIN(local interconnect network)，FlexRay，TTx，MOST(media oriented system transport)，D2B(digital domestic bus)などの通信プロトコルが規格化され，車載ネットワークを形成してECUの分散処理を行っています．また，目的や用途，コストによって，1台の車に2系統以上のネットワークを使っている例も少なくありません．その詳細な技術紹介については，本誌の2005年5月号の特集2「ザ・新人研修！組み込みシステム開発編」および参考文献(3)を参照していただければと思います．

ただし，自動車とロボットには要求が異なる部分もあり

ます．自動車は人の操縦によって平たんな道路を走るのが一般的であるのに対して，ロボットはより複雑な動作環境で人間の多様な作業要求を自律的に達成していくことが期待されています．自動車における分散処理は，温度や湿度などの変動が大きい環境下で確実に動作するハードウェア技術と，安全性や快適性と運動性能を両立させるソフトウェア技術の高度な集積から成り立っています．

また，ロボットの分散処理技術には，別の難しさが隠れています．例えば，人間と機械のかかわり方から見ると，自動車のECUにおける分散処理は，操縦者である人間の補助を目的としているのに対して，ロボットの分散処理は，ロボット自身の自律化を目標としています．また，自動車の運動が基本的に移動に限られるのに対して，ロボットの運動は，より複雑な地形での移動はもちろんのこと，手や指，また数多くの運動自由度を持つ体全身を動かして作業に臨みます．ですから，各自由度間の動作の同期・協調の実時間性に対する要求の厳しさや作業の複雑さを考えると，ロボットの分散処理は決して楽ではないことがわかります．

3．ロボットの「分散処理」とは何か？

それでは，ロボットの「分散処理」とは何を目ざしているのでしょうか．ロボットの分散処理は大きく分けて次の二つに分類できます．

a）1台のロボットにおける分散処理

b）複数台のロボットにおける分散処理

また，一般的にソフトウェアの分散化やハードウェアの分散化，タスクの分散化のように分けることもできます．

b）については，たいへん内容が豊富ですので，参考文献(4)に譲ります．ここではおもに1台のロボットにおける分散処理を中心に議論していきたいと思います．

● なぜ分散処理が求められているのか

そもそも，これからのロボットにとってなぜ分散処理が求められているのでしょうか．どういった分散処理の構成が考えられるのか，また，分散処理によって何のメリットがあるのでしょうか．これらについて考察していきましょう．

分散処理と分散制御の違い

column

誤解を避けるために，「分散処理」と「分散制御」の単語の取り扱いについて説明しておきます．「分散処理」というと，関連するキーワードとして，例えば，計算機・情報工学では「並列分散処理」や「ネットワーク」，「分散人工知能」または最近の「グリッド・コンピューティング」や「ユビキタス」が連想されます．一方，システム制御工学では，これに近い概念として「分散制御」や「自律分散」といった研究がなされています．

一般にロボットの動きを1台のCPUではなく，関節ごとに配置したCPUで制御することを「分散制御」と呼び，大量のセンサ入力から運動に必要な感覚情報を抽出するための計算処理を「分散処理」と区別して考えることが多いようです．ただし，本稿ではこの両面を区別せず，まとめて「ロボットの分散処理」という一つの枠組みの中で議論を進めていきます．

情報工学の立場から見れば，「並列分散処理」は，複数のプロセスを物理的に分散している計算資源上で実行させ，互いに情報交換をしながら目的となるアプリケーションを処理する技術です．**1）**タスク分割・多重化，**2）**スケジューリング，**3）**計算処理，**4）**各プロセス間の通信が基本的な操作となっています．ここでは，スケジューリングを適切に行うことによって通信負荷と計算負荷のトレードオフ評価を行い，これによって処理速度の改善や計算機設備資源の有効活用，コスト削減，信頼性確保，情報伝達の広域化などを実現することが重要な課題となります．今までの技術例として，メッセージ・パッシングや共有メモリを使ったプロセス間通信，ネットワークOS，分散透過性を提供する分散OS，分散型データベースが挙げられます．また，最近では情報の緊急度に応じた分散リアルタイム・システム技術(5)も提案されています．

一方，制御理論で取りあげられている「分散制御」は，集中制御との対比から生まれた概念です．集中制御では制御対象のすべての情報を1ヵ所に集約して利用することによって制御入力を決定するのに対して，分散制御は制御対象の各部分から得られた局所情報だけでその部分の状態を制御し，全体の制御目的を達成しようとします．

ロボットの分散処理は，情報工学における分散処理技術と制御工学でいう分散制御技術の双方を完全に包含する関係にあり，また，ロボットの運動や作業の実現などの点でより具体性を持っています．ここでは，ロボットの機構構造に則した制御装置の構造化と膨大な情報の実時間並列分散処理を同時に要求しています．

これに加えて，両者をさらに作業実現という統一の目標に向けて統合させることも重要です．よって，未知なる環境の変化に対して，迅速に対応できる機構と機能の分割と統合が中心課題となっています．また，物理原理に従って動くロボットのリンク機構が実世界において実時間内に目的の作業を実現する1点に絞られることから，各運動自由度をいかに環境条件に応じて協調させながら動作させるかを考えなければなりません．

これからのロボットには，より複雑な作業環境下で，多種多様な情報を収集して実時間で認識し，高い自律性を持って多様性に富んだ動作を柔軟に実現できることが期待されます．中でも実時間性の確保はもっとも重要で，多種多様な情報の収集と処理，多くの関節の制御，環境に応じた多様な動作の計画と制御などの要求を同時に満たすことを考えると，自然に「分散処理」技術にたどり着きます．いや，唯一のアプローチであるのかもしれません．

ロボットの分散処理のしくみは，計測制御用ハードウェアのレベルでの分散や，情報処理・運動制御のソフトウェアのレベル，また行動機能レベル，さらには高度な作業レベルに至るまで，さまざまなレベルで検討されています．また，単に均一的に各レベルでのタスクや構造を分割させるだけではなく，タスクの優先順位や，情報処理の抽象度・緊急度・局所・大域性・通信量に応じた階層化構造も提案されています．さらに，最近の開発の取り組みとしては，ロボットの構成パーツとして，機構・センサや計測・制御回路，計測・制御・通信用ソフトウェアを一体化したモジュール化や部品化，複数のモジュール間やロボットどうしを接続するインターフェースの規格化，標準化が進んでいます．なお，制御装置の小型化，省配線化，軽量化など，ロボットの認知・移動・作業の自律化を図る実装上のさまざまな検討もなされています．

分散処理の付加価値として，ロボット内の配線空間の節約や，耐故障性，拡張・縮小性，保守性などの大幅な改善も期待されています．**図3**は，制御装置の集中方式と分散方式の簡単な比較を示しています．この図からわかるように，分散方式ではロボットにおける配線が少なくかつ短くなります．これによって，ロボットはコンパクトになり，加えて電気的なノイズの影響も改善できます．

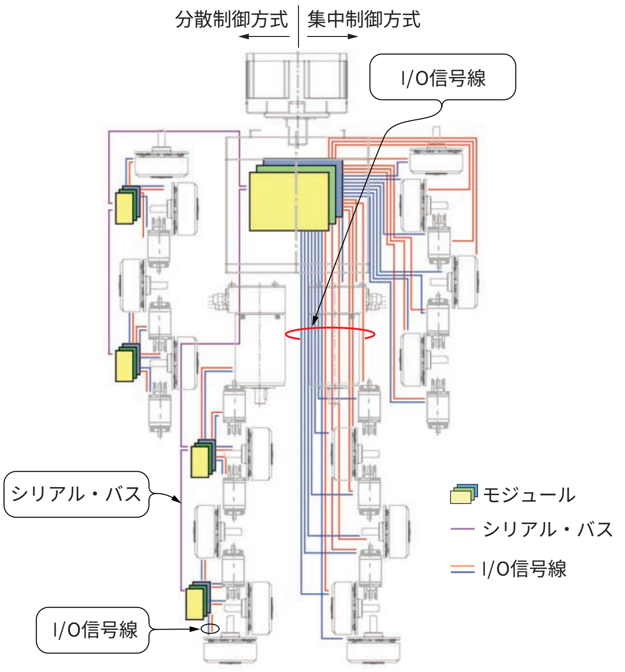


図3　人型ロボットにおける集中制御方式と分散制御方式の比較
右の集中制御方式と比べて，左の分散制御方式では，配線が少ない．しかも1本当たりの長さが短い．

● 開発時のキーワードは「連携」

実際の分散処理の設計に先だって，以下に示すロボットに由来する各問題点に注意する必要があります．まず，機構や運動制御駆動に関するハードウェアの側面から見ると，ロボットの力学特性は基本的に非線形であり，ある部分のリンク運動がほかの部分の運動に強く干渉してしまうおそれがあります．したがって，運動自由度ごとに制御を完全に独立させることは困難で，ある全身動作を行うときには各関節間の連携が必要になります．分散的に関節を制御する場合は，関節間の同期を確保して制御する必要があり，また，分散した制御系間に双方向の通信遅れがあると，機械に振動や不安定現象を引き起こしてしまうので注意が必要です．

次に，情報処理全般のソフトウェアに関する面からは，分散処理におけるロボットの局所情報処理と大域的な秩序形成との関連に注意します．簡単な多脚ロボットの例で言えば，これは脚1本1本の運動がロボットのボディ運動にどのように寄与するかに相当します．また，環境に関する膨大なセンサ情報から，認知処理の内容や処理速度が身体運動制御にいかに統合させるかを考える必要もあります．これは，面状触覚センサを利用した物体の抱き上げ動作を考えると，抱き上げのために触覚センサから実時間で何の情報が必要かという問題に相当します．

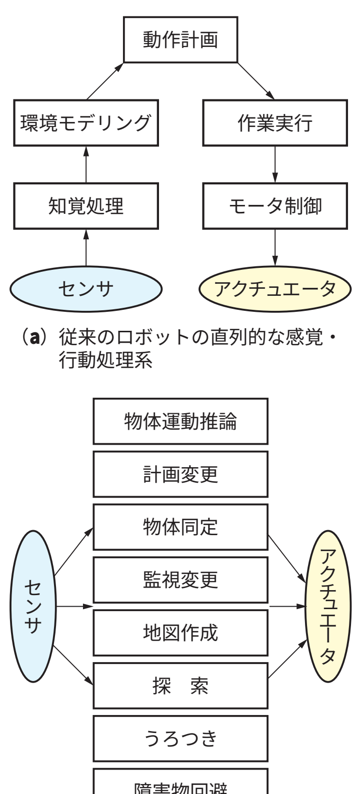
この問題に関連して，人工知能研究でも20年前からフレーム問題[注1]が大きく取りあげられ，熱心に研究されてきました．さらに，ロボットでは基本的に記号論理といった離散的な情報と関節運動に関する連続的な時間信号が混ざ

注1：フレーム問題（frame problem）は，1969年にマッカーシー（John McCarthy）とヘイズ（P.J.Hayes）が指摘した人工知能研究の最大の難問．ロボットの当面の作業にとって，実世界で起こる無数の出来事のどれが関係して重要なのかを分けて評価することや，また，その状況に応じて複数の可能性から適切な行動を選択して実行することを指す．いずれも実時間で対処することが困難なことを問題にしている．

っていて，これらの情報をもとにタスクのスケジューリングと制御を行わなければなりません．これは難問です．例えば，座っている状態から立ち上がって歩くという動作は，「座る」，「立つ」，「歩く」といった部分部分の動作のつなぎ合わせで構成されていることがわかります．このようなロボットの連続的な動作実行と離散的な動作切り替えが混ざった複雑な動きについては，制御工学の研究でハイブリッド・システム（hybrid system）としてモデル化され，解析されつつあります．結局のところ，ロボットの分散処理におけるタスクの分割，組織化，統合の一般原理は，まだ明確化されていないのが現状です．

4．「分散処理」開発の現状

ロボットの分散処理をめぐって現在，いくつかの技術が開発されています．ここでは，これらの技術を，ソフトウェアとハードウェア，アーキテクチャの三つに大別して概説します．また，ロボットの具体例を挙げて，その作業目的に照らし合わせて，分散処理がいかに行われているかを紹介し，それらにおける問題点を指摘します．



（a）従来のロボットの直列的な感覚・行動処理系

（b）サブサンプション方式の並列分散処理

図4 直列的なタスク処理方式とサブサンプション方式の違い

サブサンプション方式は，ロボットの柔軟な環境適応移動を実現する．

● インターフェースの標準化や，部品化，階層化が進む

ソフトウェア技術の側面では，日本ロボット工業会の主導で，各ロボットの持つ情報をネットワークを介して通信し合うためのインターフェースの標準化が図られています．ロボットの代表的なメーカが参加して，機種やネットワークの違いを超えて，統一的なアクセスを可能にするネットワークOriN（オライン）（Open Resource interface for the Network / Open Robot interface for the Network）が開発されています．

また，産業技術総合研究所では，ヒューマノイド・ソフトウェア開発プラットホームOpenHRP（Open Architecture Humanoid Robotics Platform）を，CORBA（コルバ）（common object request broaker architecture）という分散オブジェクト技術を使って構築しています．

一方，ソニーは，AIBO 注2 開発に伴ってエンターテインメント・ロボット用開発環境OPEN-Rを策定し，ハードウェアとソフトウェアの部品化，また構成に関する階層化を提案しています．

東芝の研究開発センターも，Javaベースの分散オブジェクト技術HORBを利用して，オープン・ロボット・コントローラ・アーキテクチャ（ORCA）を開発しています(3)．また，関連技術として，ネットワーク上のマルチメディアの通信品質を最適化するために提案されているQoS（quality of service）の考えかたと技術も注目すべきではないかと思います．

● 新しいデバイスの恩恵を受けて小型化，低消費電力化

これに対して，ロボットの分散制御を支えるハードウェア技術について，十数年ほど前は，トランスピュータやVMEバス，DSP（ディジタル信号処理プロセッサ），共有メモリ技術が主流でしたが，近年では，FPGAやFPAA（field programmable analog array），マルチマスタ方式の共有メモリ通信技術，そして，動的再構成可能なデバイス（例えば，DAPDNA）が注目されつつあります．よってICの集積化技術の進展に促され，ロボットの制御装置が高機能を保ちつつも，いっそうの小型化が可能になってきています．ただし，実システムに採用するに際しては，消費エネルギーや実装コストの観点からの評価も忘れてはなりません．

注2：2006年1月26日，ソニーは2005年度末にAIBOの生産を終え，QRIOの新規開発も中止すると発表．ただし，AIBOとQRIOで培ったAIの研究開発は継続するという．

ロボットのアーキテクチャのレベルの分散処理については，従来のセンサ入力→知覚処理→環境モデリング→動作計画→作業実行→駆動制御→モータ制御→アクチュエータ動作といった直列的なタスク処理方式に対する反省から，タスクの優先度を考慮に入れた並列的な分割処理方式，例えば，サブサンプション（subsumption）方式が20年前に提案されました．

直列的なタスク処理では，どれか一つの処理が失敗した場合，直ちに全システムが動作不能な状態に陥ってしまいます．また，システムの機能拡張を試みるときは，全システムの改造が必要となります．さらに，ロボットの作業目的の多様性や多種多様なセンサ入力への対応が困難です．

複雑な環境で自律的に移動するロボットを例に説明します．まず，ロボットの自律移動を，障害物回避，うろつき，探索，環境地図作成，外部物体運動の推定などのサブタスクに分割します．センサ入力を使ってこれらのすべてのサブタスクを同時に処理し，優先度に応じた重み付けを行います．そして，その結果をもとに車輪を回転させるようにモータ制御を行うことで，ロボットの柔軟な環境適応移動を実現しています（図4）．

5．ロボットの開発事例

分散処理を行うロボットの開発事例を二つ紹介します．

● 構造に適した歩行を自動的に決める多脚歩行ロボット

一つ目は，モジュール構造をもつ多脚歩行ロボットです．図5と写真1に示す階層型分散歩行制御方式で制御されるこのロボットは，各モジュールに自脚の運動を制御する制御装置とソフトウェアを備えています．上位制御器からの情報をもとに，隣接する足との局所通信で互いに特定の位相差で動かし，結果として調和のとれた歩行が実現され，ロボット本体が移動します．

また，ロボット本体には，外部環境に対する認識処理に基づいて本体の移動方向を計画し，すべての脚モジュールにブロードキャスタ方式で同一指令を知らせるだけで，モジュールが自律的に動作を決定し，歩行が行われます．このため，上位制御器は各脚の動作を個別に計算する必要がなく，環境を認識することによって機敏に歩行の方向変更を決定できます．また，写真1に示すように，各脚の結合構造が変わっても，各モジュールに手を加えることなく新しい結合構造に適した歩行を実現できます．

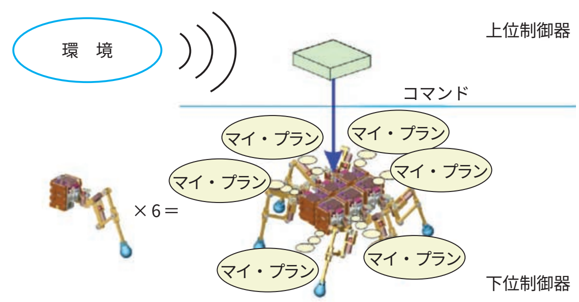


図5　多脚歩行ロボットの階層型分散制御

上位制御器では，環境状況に対する認識や人間による運動指令で運動計画を立て，下位制御器にブロードキャスタ方式で同一指令を知らせる．これに基づいて，下位では隣接する脚の間に位相差を作り出し，結果として調和のとれた多脚歩行が実現される．

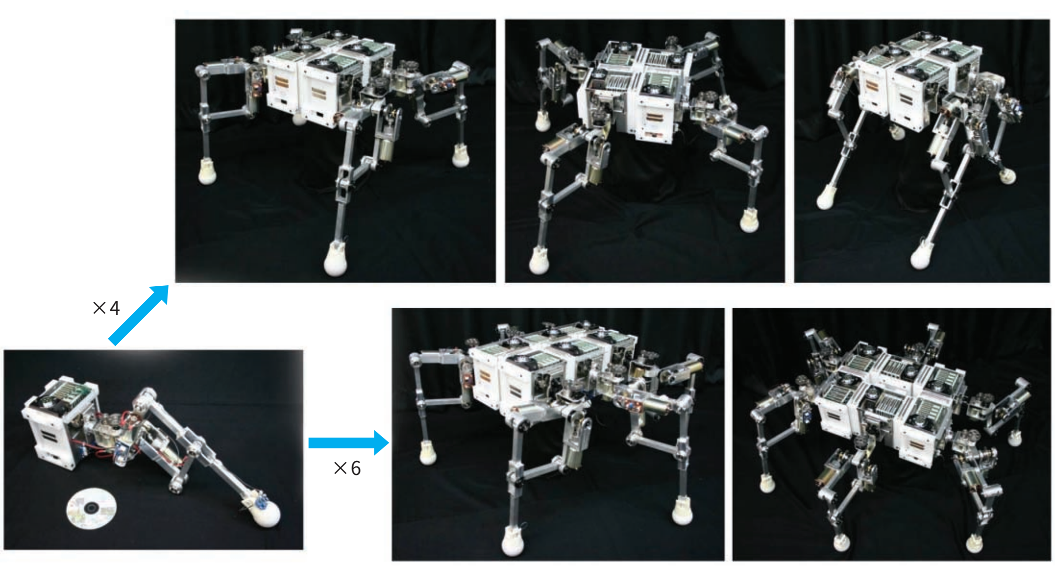


写真1[6]　モジュール構造をもつ多脚歩行ロボット

機構，センサ，計測制御回路，計測・制御・通信用ソフトウェアを一体化したモジュールによる多脚歩行ロボット．各脚の間の結合構造が変わっても，各モジュールに変更を加えることなく新しい結合構造に適した歩行を実現できる．写真は，独立行政法人理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター 小田島 正氏提供．

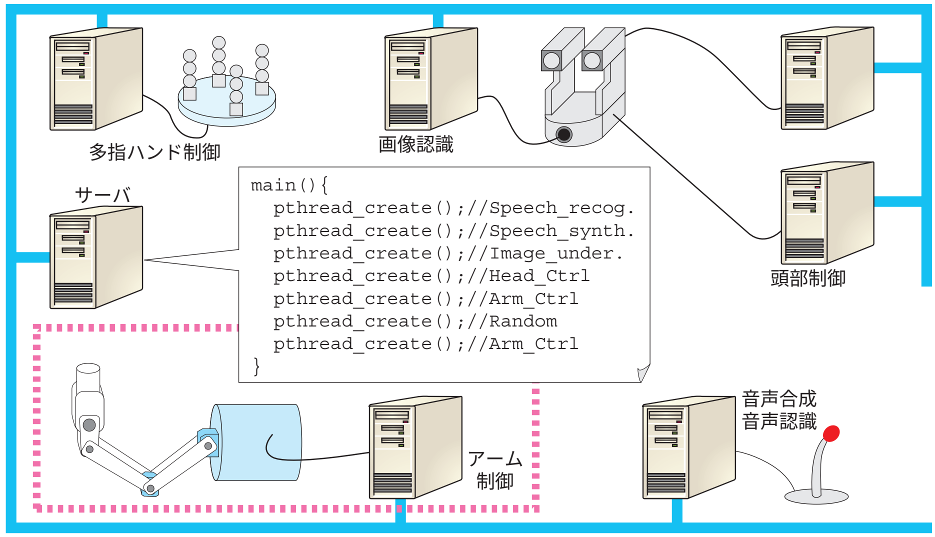


図6
音声による指示で動作する双腕ロボットの分散処理系
点線で囲んだ部分がアーム制御モジュールに相当する.

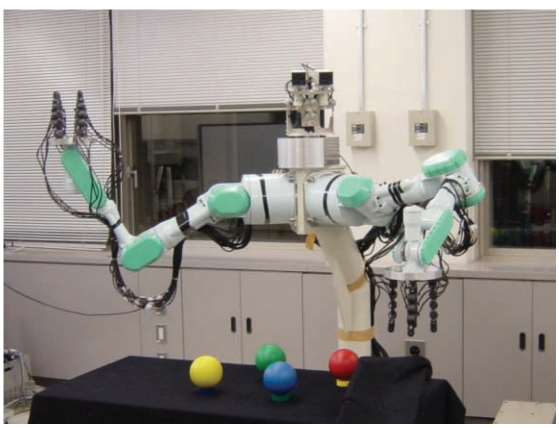


写真2　音声による指示で動作する双腕ロボット
2台のカメラとスピーカが付いた頭部と，4本の指を持つ双腕が支柱に固定され，全部で49の運動自由度で構成されている．写真は，独立行政法人理化学研究所提供．

● 人とコミュニケーションする双腕ロボット

次に，人間との音声による会話や身振り手振りを使い，円滑な意思疎通のもとに目標タスクを実現するロボット(**写真2**)の事例を紹介します．このロボットは，**図6**に示すように，2台のカメラとスピーカの付いた頭部，4本指を持つ双腕が支柱に固定されており，全部で49の運動自由度で構成されています．このロボットの基本的な作業として，人間との会話に基づいた物体の保持や運搬を想定しています．

「こんにちは」，「元気ですか？」などの問いかけには返事をし，「クイズを出してください」などと頼むと，三者択一のクイズを出題します．クイズに正解した場合には，机の上に並べてあるカプセルのうち，どれが欲しいかを尋ね，会話者の答えた色のカプセルを画像認識によって探し出し，それをつかんで渡すという動作を行います．

これらの動作を行うためにロボットは，音声認識，音声合成，画像認識，ヘッド制御，アーム制御，ハンド制御機能を持つ必要があります．そして，これら複数の機能を分散処理するために，複数のコンピュータとそれらを統合する1台のサーバでロボットの制御系を構成しています．

図6にはロボットの分散処理システムを示しています．本ロボットは，「一つ，あるいは複数のハードウェアを制御するためのコントローラ」としての機能を持つコンピュータをネットワークに接続し，サーバとなるコンピュータに対して，立ち上げた各モジュールを管理するスレッドを利用することで動作命令やタイミングを取得します．

具体的な分散処理の構造については，制御対象となるハードウェアとそれを制御するコンピュータ，実際に動作するタイミングを与えるサーバにおけるスレッドをまとめて一つのソフトウェア・モジュールとして完結しています．例えば，**図6**の点線で囲んだ部分がアーム制御モジュールに相当します．独立したコンピュータとサーバのスレッドによって分散制御を行うことで，各コンピュータの計算負荷を軽減させ，モジュールごとに取り替え可能なシステムを作ることができます．また，すべてを監視するスーパーバイザが各モジュールに命令を出すトップダウン的な制御ではなく，各モジュールがロボットの内部状態によって分散的に動作を決めるボトムアップ的な制御ができます．

サーバでは，各ハードウェアを制御するスレッド以外に，時間がたつとランダムにロボットの内部状態を遷移させる

スレッドを立ち上げており，それをランダム状態遷移モジュールとしています．

実装の観点からロボットの自律化を見れば，このロボットの制御に使う9台のパソコンはロボット本体と完全に分離した形で構成されています．まだまだ自律化されたとは言えませんが，最近，筆者らは制御システムの小型化を図り，ロボット本体内に分散配置できるようになりました．

このロボットのタスク実行において，音声認識による会話の中の単語認識や，画像処理によるボールの色の識別処理結果などは記号として表現されますが，腕や指または頭を動かす処理は連続時間信号による動力学制御になります．したがって，全体を管理するサーバから見れば離散的な記号と連続時間信号を両方同時に扱ってロボットのタスク・スケジューリングを行わなければなりません．これは前にも述べたとおり，たいへん難しい問題です．

6．今後の展開

これからのロボットの研究開発にとっては，構造から機能まで，生物の分散処理のしくみを学ぶことが重要です．生物は，中枢となる脳神経系による高度な分散処理によって，今までのどのロボットよりも複雑な環境において柔軟に運動します．

脳神経系は，ノイマン型計算アーキテクチャとは根本的に異なります．感覚系による環境認知だけでなく，高次な記憶や論理思考，場合によっては情動までに依存した意思決定や動作を計画します．体温や血圧，血糖など身体の内部状態を維持管理しつつ，環境に積極的に働きかけて高度な身体運動制御機能を備えます．また，量的にも種類的にも数多くのセンサを駆使して，環境との力学的な相互作用を通して実時間における環境変化に適応し，運動の学習，熟練が達成されます．

現在の脳科学研究では，脳神経系による高度な運動制御機能は，機能が局在した大脳皮質，大脳基底核，小脳，そして脊髄反射系などのモジュール化，階層化，複合化で達成されていると解釈されています．また，生物に多く見られるさまざまな周期運動は，脊髄レベルにおけるCPG（central pattern generator）による分散処理で実現されていると示唆されています．冗長な運動自由度を同調させる非線形振動の引き込み原理がその本質を果たしています．

生物の分散処理を学んだ具体的な技術開発として，皮膚触覚を模擬したソフトな人工皮膚や，自己組織化アルゴリズム，分子生物学原理からのヒントで考案された並列処理による最適化を行う遺伝的アルゴリズムなどが挙げられます．

現状，微小電極や脳のイメージングなどの計測技術によって個別の神経細胞の電気的活動や脳の機能局在が解明されつつありますが，脳神経系による時空間情報のコーディング，脳内における情報の構造化，モデル化，情報の分析・統合，環境との相互作用で生じた制御機能の発達など，脳の高次認知制御機能については，いまだに仮説・検証のレベルにあり，その本質となる基本原理はほとんど明らかにされていません．これらの基本原理の解明は，これからのロボットの分散処理研究に対して大きなインパクトを与えるでしょう．

＊　　＊　　＊

このように，ハードウェアからソフトウェアまで，計算処理から通信ネットワークまで，モジュール分割からシステム統合まで，また情報処理から制御駆動まで，自己組織化から機能創生まで，さらには機械から生命まで，ロボットの分散処理にかかわる知識分野が実に広いことがわかります．分散処理技術開発の進展によって，実世界で多様性に富んだ動的なタスクを実行可能なロボットが誕生することを願っています．

参考・引用*文献

(1) 特集1「メカトロ機器開発」で身を立てる！，Design Wave Magazine，2004年5月号，pp.24-84.
(2) 特集2 ザ・新人研修！ 組み込みシステム開発編，Design Wave Magazine，2005年5月号，pp.60-93.
(3) 特集　ロボットのオープン化，モジュール化，ネットワーク化技術，日本ロボット学会誌，vol.21, no.6，2003年9月.
(4) 長田 正ほか；自律分散をめざすロボットシステム，オーム社，1995年.
(5) 特集　人間支援のための分散リアルタイムネットワーク，情報処理，no.44，vol.1，情報処理学会，2003年1月.
(6) 第23回 日本ロボット学会学術講演会講演概要集，p.177，2005年.

羅 志偉（Zhi-Wei Luo）
独立行政法人理化学研究所
バイオ・ミメティックコントロール研究センター

ひらの・しんや
愛知工業大学　大学院工学研究科